

Р.В. Шульц, *д-р техн. наук, професор*,
С.П. Войтенко, *д-р техн. наук, професор*,
П.Д. Крельштейн, *канд. техн. наук, доцент*,
Київський національний університет
будівництва і архітектури
І.А. Маліна, *канд. техн. наук, доцент*,
Одеська державна академія
будівництва і архітектури

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТОЧОК ПІД ЧАС АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АППАРАТІВ

У роботі розглянуто питання виконання попереднього розрахунку точності визначення координат точок за матеріалами аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наведено математичну модель визначення координат за парою аерофотознімків. Математична модель враховує використання даних GNSS для визначення координат центрів фотографування та корегування інерціальної навігаційної системи (INS). Кутові елементи зовнішнього орієнтування у наведеній математичній моделі визначають за допомогою INS. Використовуючи алгоритм перетворення кореляційних матриць отримано строгий вираз для виконання попереднього розрахунку точності. Методом варіювання отримано вираз для розрахунку впливу систематичних похибок. За отриманими виразами виконано дослідження апріорної точності визначення координат для різних умов аерофотознімання. Експериментально розраховано точність аерофотознімання для БПЛА з типовими характеристиками, для створення топографічних карт і планів.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, розрахунок точності, інерціальна навігаційна система, кореляційна матриця, аерофотознімання.*

Постановка проблеми. Технологія аерофотознімання із використанням БПЛА нині набула значного поширення. БПЛА використовують для вирішення завдань з топографічного картографування, моніторингу, інвентаризації та спеціалізованих військових завдань [10; 15; 17; 19]. Значної популярності ця технологія набула серед геодезистів і фотограмметристів для створення топографічних планів і карт за матеріалами аерофотознімання об'єктів невеликої площі. Завдяки своїм особливостям знімання з БПЛА впевнено займає нішу між традиційним аерофотозніманням та наземним топографічним зніманням. Основна особливість та відмінність аерофотознімання з БПЛА, порівнянно з традиційним аерофотозніманням, полягає у якості даних. Обмежені габарити та низькі тактико-технічні характеристики БПЛА [2; 13] не дають змоги встановлювати на них високоякісну навігаційну та знімальну апаратуру, тому якість даних з БПЛА є

набагато гіршою від матеріалів аерофотознімання. Матеріали знімання із БПЛА характеризуються значними кутами нахилу, різномасштабністю знімків, а геометрія маршрутів – відхиленнями від попереднього проекту, що потребує використання не тільки строгих методів оброблення, а й залучення робастих методів [1; 14]. Проектуючи традиційне аерофотознімання, спираються на вимоги до кінцевої точності отримання координат контурів та висот точок на топографічному плані або карті. При цьому використовують загальновідомі спрощені вирази для попереднього розрахунку точності. У разі аерофотознімання з БПЛА для розрахунку слід використовувати строгі вирази, у яких відобразатиметься вплив факторів, що знижують точність аерофотознімання. Отримання таких виразів є необхідним й актуальним завданням цифрової фотограмметрії, розв'язання якої дасть змогу більш якісно виконувати проектування аерофотознімання з БПЛА та правильно обирати параметри фотографування.

Огляд попередніх публікацій. Оскільки основною метою роботи є отримання строгих виразів для попереднього розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА, то ми не будемо аналізувати результати, отримані у класичній фотограмметрії для традиційного аерофотознімання. Отримані досить давно прості вирази для попереднього розрахунку добре себе зарекомендували і до теперішнього часу використовуються у традиційній фотограмметрії.

Аналізуючи відомі роботи з використання БПЛА, відмітимо, що найчастіше попередній розрахунок точності виконують за найпростішою схемою, в якій основним фактором вважають роздільну здатність цифрової камери [16; 18]. За кінцеву точність фактично беруть роздільну здатність на місцевості, що є абсолютно неприпустимим. У виборі параметрів фотографування з БПЛА, на відміну від звичайного аерофотознімання, доводиться враховувати велику кількість додаткових умов, зокрема стан атмосфери, можливу висоту і швидкість фотографування, час роботи, аеродинамічні характеристики БПЛА та ін. Найбільш детальний огляд всіх факторів та розрахунок їх впливу наведено в роботі [7], проте точність знову-таки розраховано за дуже наближеними виразами.

За параметрами й обладнанням (швидкість знімання, фотографічна і навігаційна апаратура) найближчим аналогом до знімання з БПЛА є мобільне картографічне знімання [3]. В дослідженнях цього напрямку за тривалий час отримано ряд виразів для попереднього розрахунку точності. Наприклад, у роботі [21] наведено вирази для розрахунку впливу точності визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування на точність мобільного знімання. Детальний аналіз багатьох факторів виконано в іншій роботі [4], зокрема шляхом математичного моделювання досліджено вплив різних факторів на точність мобільного знімання. Найбільш вдалий підхід до виконання попереднього розрахунку наведено у статті [5], у якій вплив похибок калібрування між INS та цифровою камерою подано у строгому вигляді через кореляційні матриці. Однак повного розрахунку в цій роботі,

на жаль, не наведено. Загалом строгих математичних виразів для розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА дотепер не отримано.

Постановка завдання Метою роботи є отримання строгих математичних виразів для розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА і виконання на основі цих виразів попереднього розрахунку для знімання з БПЛА, що має типові характеристики для вирішення топографічних завдань.

Методика дослідження. Отримаємо вирази для попереднього розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА. Модифікуємо математичну модель, яку використовують у мобільному зніманні [4], до випадку аерофотознімання. Попередньо зауважимо, що для визначення координат центрів фотографування передбачено застосування GNSS, а для визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування – мікроелектромеханічна INS [9; 11; 12; 20]. В такому разі обов’язково потрібно брати до уваги той факт, що GNSS та INS використовують для отримання інтегрованого рішення про місцезоположення та орієнтацію, що, з одного боку, покращує навігаційне рішення, а з другого – призводить до появи специфічних джерел похибок (похибки орієнтування між GNSS та INS, похибки синхронізації) [4; 5; 6; 8]. Для запису математичної моделі наведемо основні геометричні зв’язки між основними засобами вимірювання під час аерофотознімання з БПЛА (рис. 1):

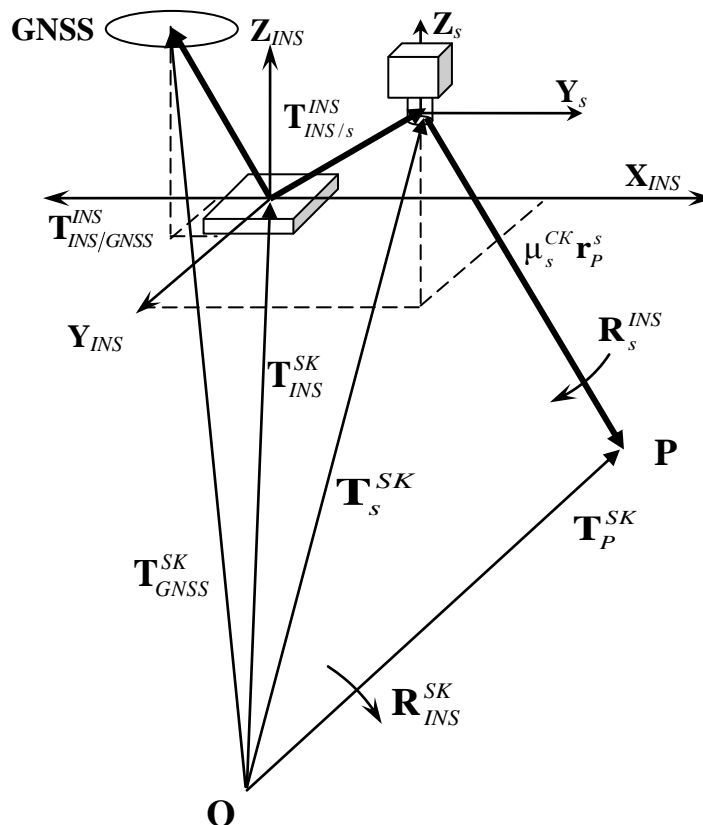


Рис. 1. Основні геометричні зв’язки між засобами вимірювання БПЛА

Основною формулою для визначення координат об’єктів за фотографічним зображенням є рівняння, яке пов’язує координати об’єкта на фотографічному

зображенні \mathbf{r}_p^s з координатами об'єкта у вибраній прямокутній геодезичній системі координат \mathbf{T}_p^{SK} . Представимо цей зв'язок у матричному вигляді [4]:

$$\mathbf{T}_p^{SK} = \mathbf{T}_s^{SK} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{SK} \mathbf{r}_p^s, \quad (1)$$

де \mathbf{T}_s^{SK} – вектор місцеположення центра проєкції S фотокамери у вибраній системі координат; μ_s^{SK} – масштабний коефіцієнт, який визначають з прямої фотограмметричної засічки і \mathbf{R}_s^{SK} – матриця розвороту між координатною системою камери та прямокутною геодезичною системою.

Під час аерофотознімання з БПЛА всі три параметри не вимірюють, а визначають. Фактично вимірюють місцеположення GNSS-антени та кути орієнтування INS відносно системи координат, що прийнята за інерціальну. В такому разі рівняння (1) модифікують для відображення складових, які визначають безпосередньо під час вимірювання.

У рівнянні (1) вектор \mathbf{T}_s^{SK} безпосередньо не вимірюють. З рис. 1 видно, що вектор \mathbf{T}_s^{SK} можна представити як суму векторів $\mathbf{T}_{GNSS}^{SK} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{SK} + \mathbf{T}_{INS/s}^{SK}$. У цьому виразі \mathbf{T}_{GNSS}^{SK} – вектор координат GNSS-приймача; $\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{SK}$ – вектор відхилення між фазовим центром GNSS-антени та математичним центром INS, $\mathbf{T}_{INS/s}^{SK}$ – вектор відхилення між центром INS та центром фотографування цифрової камери. До того ж зауважимо, що матрицю повороту \mathbf{R}_s^{SK} можна представити як добуток двох послідовних поворотів з системи цифрової камери S до INS системи та з INS системи до прийнятої геодезичної системи SK. Остаточо рівняння визначення координат записують в такому вигляді:

$$\mathbf{T}_p^{SK} = \mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \left(\mathbf{T}_{INS/s}^{INS} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_p^s \right), \quad (2)$$

де \mathbf{T}_p^{SK} – вектор місцеположення точки, в геодезичній системі – **невідомий**; \mathbf{r}_p^s – вектор місцеположення точки на фотознімку – **вимірний**; $\mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK}$ – вектор місцеположення GNSS-приймача – **вимірний** в геодезичній системі; $\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}$ – матриця повороту з INS системи в SK геодезичну систему – **вимірня**; $\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}$ – вектор відхилення між INS системою та S системою цифрової камери, визначений через **калібрування** в системі координат INS; $\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}$ – вектор відхилення між INS системою та GNSS-антеною, визначений через **калібрування** в системі координат INS; μ_s^{SK} – масштабний коефіцієнт між S системою камери та SK системою, **визначений** за допомогою стереовимірювань; \mathbf{R}_s^{INS} – матриця повороту між INS системою та S системою камери, визначена через **калібрування**.

Вираз $\mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_p^s$ можна представити відомими рівняннями аналітичної фотограмметрії. Ці рівняння пов'язують виміряні координати на знімку з просторовими фотограмметричними координатами:

$$Y_p^s = \frac{B_t y_t}{P_t}; \quad X_p^s = \frac{B_t x_t}{P_t}; \quad Z_p^s = \frac{B_t f}{P_t}.$$

У цих рівняннях індекс t вказує на трансформовані значення базису, координат та повздовжнього паралакса. Відмінність цих рівнянь від класичних в тому, що кути в напрямних косинусах являють собою постійні величини для кожного моменту фотографування. Це кути розвороту між системою координат цифрової камери та системою координат, реалізованою за допомогою INS. Загалом величини цих кутів не перевищують 1-2°. У кінцевому вигляді рівняння (2) запишемо так:

$$\mathbf{T}_P^{SK} = \mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS}, \quad (3)$$

де $\mathbf{T}_P^{INS} = \mathbf{T}_{INS/s}^{INS} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s$.

Аналізуючи рівняння (3), можна дійти таких висновків:

- точність знімання залежать від точності всіх складових вимірювальної системи, неможливо однозначно виділити групу похибок, що домінують;
- певна група похибок виникає через калібрування окремих зв'язків між вимірювальними елементами і має як випадковий, так і систематичний характер;
- у процесі використання вимірювальних систем, показання яких змінюються з часом, виникають похибки синхронізації.

Для того щоб врахувати всі джерела похибок та отримати рівняння похибок, скористаємося стандартною процедурою перетворення кореляційних матриць. За вихідне рівняння беремо вираз (3). Після певних перетворень отримаємо рівняння похибок у визначенні координат точок за матеріалами аерофотознімання з БПЛА у матричній формі.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^{SK}} = & \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{GNSS}^{SK}} + \frac{\partial(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS})}{\partial angle} \mathbf{M}_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}} \left(\frac{\partial(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS})}{\partial angle} \right)^T + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}} \left(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}} \left(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^{INS}} \left(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \left[\mathbf{v} + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right] m_t^2 \left[\mathbf{v} + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right]^T \left(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T \end{aligned} \quad (4)$$

Кореляційна матриця $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^s}$ також може бути представлена як

$$\mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^s} = (\mu_s^{SK})^2 \frac{\partial(\mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s)}{\partial angle} \mathbf{M}_{\mathbf{R}_s^{INS}} \left(\frac{\partial(\mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s)}{\partial angle} \right)^T + (\mu_s^{SK})^2 \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{M}_{\mathbf{r}_P^s} \left(\mathbf{R}_s^{INS} \right)^T. \quad (5)$$

Таким чином, основними складовими рівняння похибок є такі кореляційні матриці: $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{GNSS}^{SK}}$ – матриця похибок визначення координат GNSS-приймачем;

$\mathbf{M}_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}}$ – матриця похибок вимірювання кутів орієнтування між INS системою та SK

системою; $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}}$ – матриця похибок калібрування вектора між центром INS системи та центром фотографування; $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}}$ – матриця похибок калібрування вектора між центром INS системи та фазовим центром GNSS-антени; $\mathbf{M}_{\mathbf{R}_s^{INS}}$ – матриця похибок калібрування кутів розвороту між осями системи координат INS та цифрової камери; $\mathbf{M}_{\mathbf{r}_p^s}$ – матриця похибок вимірювання координат точки на знімку; m_t – похибка синхронізації GNSS та INS.

Рівняння впливу систематичних похибок отримаємо з рівняння (3) простим варіюванням.

$$\begin{aligned} \delta_{\mathbf{T}_P^{SK}} = & \delta_{\mathbf{T}(t)_{INS}^{SK}} + \mathbf{T}_P^{INS} \delta_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}} - \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}} + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_P^s} + \left[v(t) + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right] \delta_t \end{aligned} \quad (6)$$

Похибка $\delta_{\mathbf{T}_P^s}$ також може бути представлена як

$$\delta_{\mathbf{T}_P^s} = \delta_{\mathbf{R}_s^{INS}} \left(\mu_s^{SK} \mathbf{r}_P^s \right) + \left(\mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \right) \delta_{\mathbf{r}_P^s}. \quad (7)$$

Отже, основними складовими рівняння систематичних похибок є такі: $\delta_{\mathbf{T}(t)_{INS}^{SK}}$ – вектор систематичних похибок визначення координат INS; $\delta_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}}$ – вектор систематичних похибок вимірювання кутів орієнтування між INS системою та SK системою; $\delta_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}}$ – вектор систематичних похибок вектора між центром INS системи та центром фотографування; $\delta_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}}$ – вектор систематичних похибок вектора між центром INS системи та фазовим центром GNSS антени; $\delta_{\mathbf{R}_s^{INS}}$ – вектор систематичних похибок кутів розвороту між осями системи координат INS та цифрової камери; $\delta_{\mathbf{r}_P^s}$ – вектор систематичних похибок вимірювання координат точки на знімку; δ_t – систематична похибка синхронізації GNSS та INS.

Рівняння (4) та (6) є основними в аналізі точності аерофотознімання з БПЛА. Для нас важливим є насамперед визначити очікувану точність визначення координат. Тому використаємо вираз (4) і виконаємо дослідження, як змінюється похибка визначення координат залежно від висоти фотографування та поздовжнього перекриття. Для дослідження візьмемо характеристики БПЛА та знімальної апаратури, наведені у таблиці.

Використаємо наведені в таблиці дані для побудови графіків зміни точності визначення місцеположення залежно від вказаних раніше характеристик.

Таблиця

Параметри БПЛА та знімальної апаратури

Параметр	Величина
Розмір пікселя цифрової камери, мкм	5
Розмір матриці цифрової камери, пкс	7200x4800
Фокусна відстань, мм	15, 25, 35
Точність визначення планових координат центра проєкції, м	0,02
Точність визначення висотної координати центра проєкції, м	0,03
Точність визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування, градус	0,01

Перш за все побудуємо графіки зміни роздільної здатності на місцевості. Всі подальші розрахунки виконано для трьох значень фокусної відстані 15 мм, 25 мм, 35 мм. Графіки зміни роздільної здатності на місцевості наведено на рис. 2.

Ці графіки використаємо у подальшому для порівняння з результатами попереднього розрахунку точності за отриманими строгими виразами. Скористаємося виразами (4), (5), виконуючи попередні розрахунки точності для різних значень висот фотографування та різної величини повздовжнього перекриття знімків. Результати розрахунків наведено на рис. 3-6.

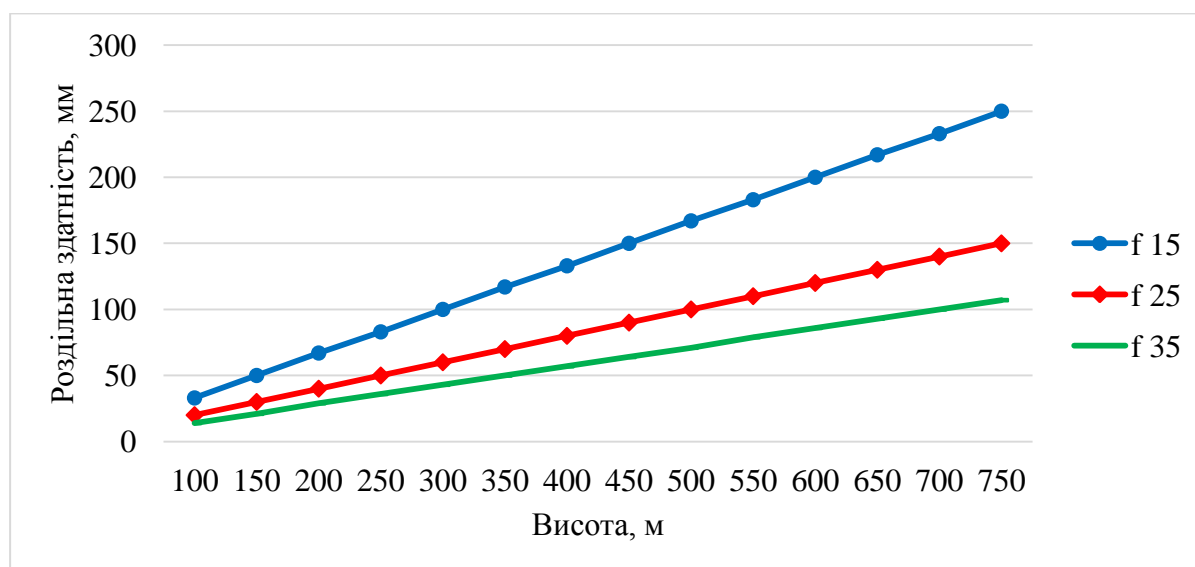


Рис. 2. Роздільна здатність на місцевості

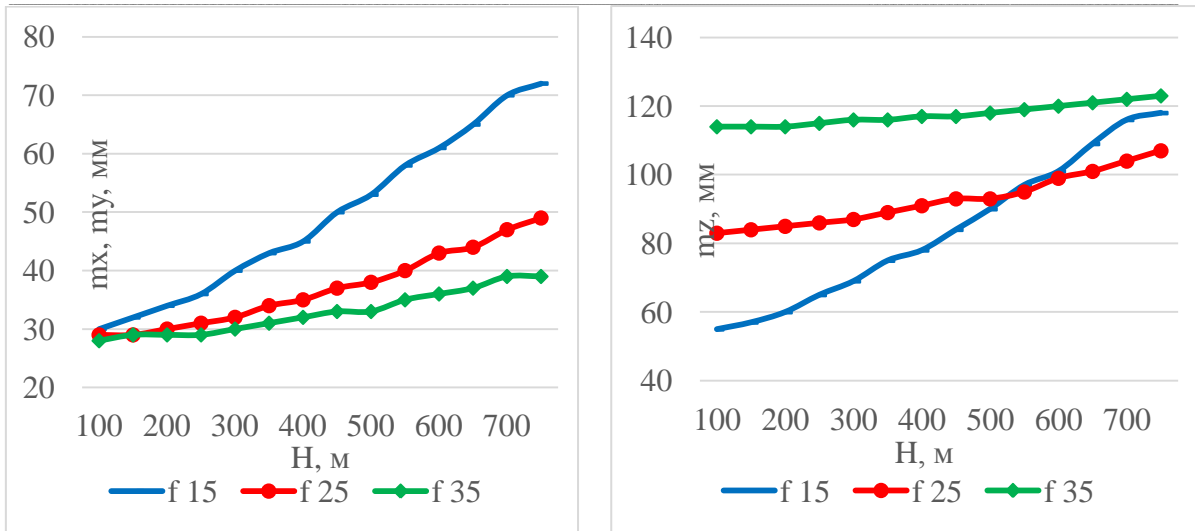


Рис. 3. Точність визначення координат (перекриття 60%)

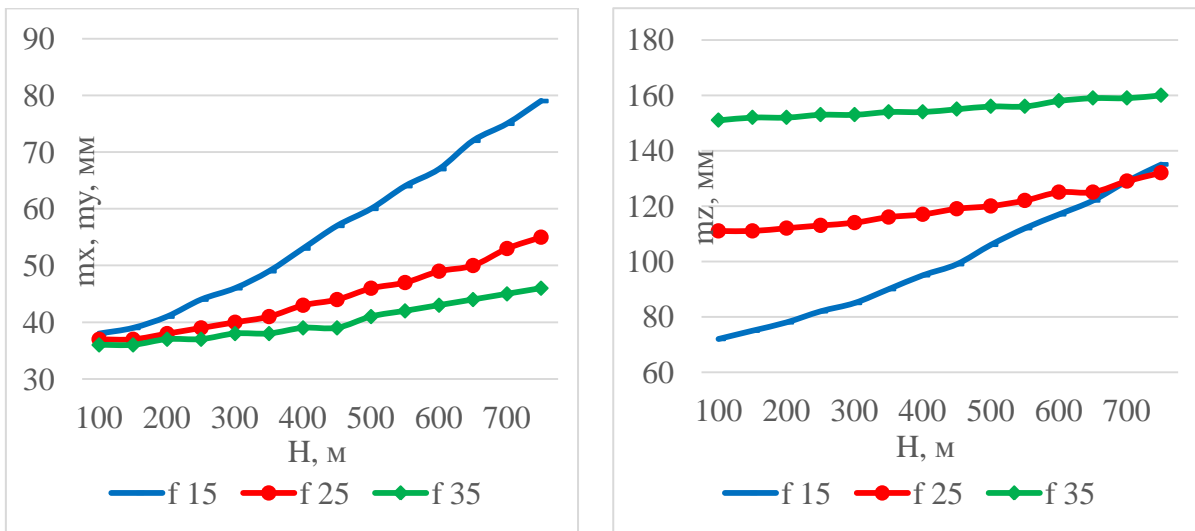


Рис. 4. Точність визначення координат (перекриття 70%)

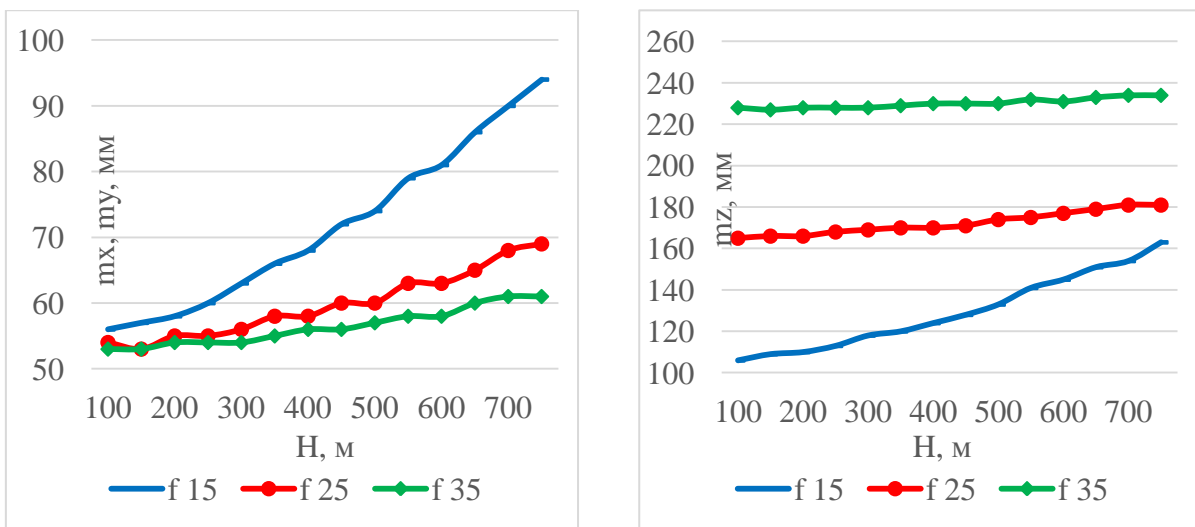


Рис. 5. Точність визначення координат (перекриття 80%)

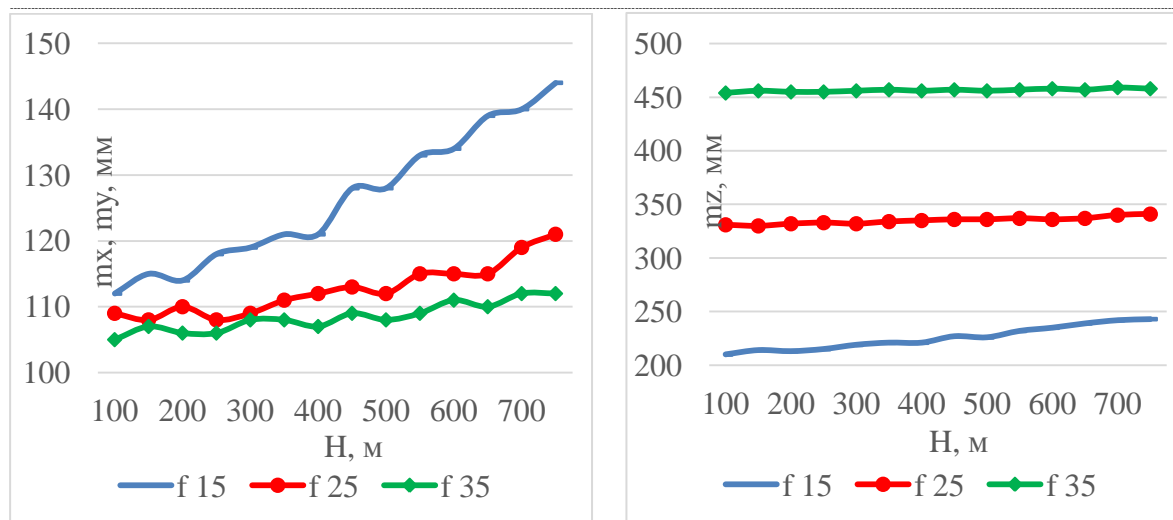


Рис. 6. Точність визначення координат (перекриття 90%)

Отримані результати доцільно проаналізувати з декількох позицій. Одразу зауважимо, що ототожнювання точності та роздільної здатності на місцевості є неприпустимими. Загалом для БПЛА, як і для традиційного аерофотознімання, залишається справедливою теза про доцільність використання короткофокусних камер з погляду точності визначення висотної складової, і навпаки, у визначенні планових координат доцільним є використання короткофокусних камер. При цьому точність планової складової змінюється за параболічним законом, а точність висотної складової – за лінійним законом. Важливим фактором є величина поздовжнього перекриття. Оптимальним для аерофотознімання з БПЛА є перекриття, що дорівнює 60% - 70%.

Висновки. У роботі отримано строгі математичні вирази для виконання розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА. На підставі цих виразів виконано попередній розрахунок точності для знімання з БПЛА, що має типові характеристики для вирішення топографічних завдань. Досліджено характер зміни точності визначення планової і висотної складової залежно від висоти фотографування та величини поздовжнього перекриття. Результати цих досліджень можуть бути використані в проектуванні аерофотознімання з БПЛА. У подальших дослідженнях планується дослідити вплив похибок кутових елементів зовнішнього орієнтування та зміни перевищень між центрами фотографування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ai, M. A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images [Text] / M. Ai, Q. Hu, J. Li, M. Wang, H. Yuan, S. Wang // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7 – P. 2302–2333. doi:10.3390/rs70302302.
2. Colomina, I. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [Text] / I. Colomina, P. Molina // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 92 – P. 79–97. dx.doi.org/10.1015/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. Ellum, C. M. The Development of a Backpack Mobile Mapping System [Text]: A Thesis for the Degree of Master of Science / C. M. Ellum. – Calgary, 2001. – 172 p.

4. *El-Sheimy N.* The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Calgary. Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta, September 1996, p. 198.
5. *Grejner-Brzezinska D.A.* High-Accuracy Direct Aerial Platform Orientation with Tightly Coupled GPS/INS System [Text]: Project / D.A. Grejner-Brzezinska, C.K. Toth. – Ohio Department of Transportation, Office of Aerial Engineering, Federal Highway Administration, 2004.
6. *Salytcheva, A.O.* Medium Accuracy INS/GPS Integration in Various GPS Environments [Text]: A Thesis for the Degree of Master of Science / A.O. Salytcheva. – Calgary, 2004. – 247 p.
7. *Secrets of UAV photomapping* [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf.
8. *Shin, E.-H.* Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation [Text]: A Thesis for the Degree Doctor of Philosophy / E.-H. Shin. – Calgary, 2005. – 206 p.
9. *Бекмачев А.* МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии [Текст] / А. Бекмачев // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 18–26.
10. *Беспилотные летательные аппараты: методика сравнительной оценки боевых возможностей* [Текст] / М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков и др.; под общ. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.
11. *Дмитриенко А. Г.* Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики [Текст] / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3(5). – С. 45–53.
12. *Желтова Н. Н.* Применение микромеханических гироскопов в навигационных системах [Текст] / Н. Н. Желтова, В. И. Обухов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 1(108). – С. 269–273.
13. *Иноземцев Д.П.* Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 1. Обзор технических средств [Текст] / Д. П. Иноземцев // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 50–54.
14. *Иноземцев Д.П.* Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 1. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN [Текст] / Д. П. Иноземцев // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 48–51.
15. *Кобелев Г. П.* Применение беспилотных авиационных комплексов в картографических целях. [Текст] / Г. П. Кобелев, Д. В. Мишута, И. Б. Страшко // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 55–57.
16. *Костюк А. С.* Навигационное обеспечение аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов [Текст] / А. С. Костюк // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 52–55.
17. *Курков В.М.* Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском полигоне» МИИГАиК [Текст] / В. М. Курков, А.В. Смирнов, Д.П. Иноземцев // Геопрофи. – 2014. – № 4. – С. 55–61.

18. Михайлов А.П. Еще раз о выборе цифровых фотокамер для выполнения аэрофотосъемки с беспилотных аппаратов / А.П. Михайлов // Тезисы 12-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Альгарве, Португалия, 2012. – С. 34.

19. Сечин А.Ю. Беспилотный летательный аппарат: применение в аэрофотосъемке для картографирования [Текст] / А. Ю. Сечин, М.А. Дракин, А.С. Киселева // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 56–58.

20. Сысоева, С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения [Текст] / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6. – С. 40–46.

21. Шульц Р.В. Вплив похибок інерціального навігаційного комплексу на точність мобільного знімання [Текст] / Р.В. Шульц // Вісник геодезії та картографії. – 2003. – №4. – С. 42-46.

REFERENCES

1. Ai, M., Hu, Q., Li, J., Wang, M., Yuan, H., Wang, S. (2015). A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images. *Remote Sensing*, 7, 2302–2333. doi:10.3390/rs70302302.

2. Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. dx.doi.org/10.1015/j.isprsjprs.2014.02.013.

3. Ellum, C. M. (2001). *The Development of a Backpack Mobile Mapping System*. Calgary, – 172 p.

4. El-Sheimy N. *The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications*. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Calgary. Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta, September 1996, p. 198.

5. Grejner-Brzezinska D.A., Toth C.K. (2004) *High-Accuracy Direct Aerial Platform Orientation with Tightly Coupled GPS/INS System*. Project, Ohio Department of Transportation, Office of Aerial Engineering, Federal Highway Administration.

6. Salytcheva, A.O. (2004). *Medium Accuracy INS/GPS Integration in Various GPS Environments*. Calgary, – 247 p.

7. *Secrets of UAV photomapping*: http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf.

8. Shin, E.-H. (2005). *Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation*. Calgary, – 206 p.

9. Bekmachev, A. (2014). MEMS-giroskopyi i akselerometryi Silicon Sensing: angliyskie traditsii, yaponskie tehnologii [MEMS gyroscopes and accelerometers Silicon Sensing: the British tradition, the Japanese technology]. *Journal Components and Technologies*, № 4, 18–26.

10. Silkov, V. I. ed. (2012). *Bespilotnyie letatelnyie apparaty: Metodika sravnitelnoy otsenki boevyih vozmozhnostey* [Unmanned Aerial Vehicles: Methods of comparative assessment of the combat capabilities]. Kiev: TsNII VVT VS Ukrainy, 288.

11. Dmitrienko, A. G., Papko A. A., Torgashin S. I., Kiryanina I. V. (2013) Ob issledovanii vozmozhnosti sozdaniya inertsiyalnyih moduley na osnove otechestvennyih tehnologiy ob'emnoy mikromehaniki [On the investigation of the possibility of creating inertial modules based on domestic technology bulk micromechanics]. Measurement. Monitoring. Management. Control, № 3(5), 45–53.
12. Zheltova, N. N., Obuhov V. I. (2015). Primenenie mikromehanicheskikh giroskopov v navigatsionnyih sistemah [Application of micromechanical gyroscopes for navigation systems]. Proceedings of the Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, № 1(108), 269–273.
13. Inozemtsev, D.P. (2013) Bepilotnyie letalnyie apparaty: teoriya i praktika. Chast 1. Obzor tehniceskikh sredstv [Unmanned aerial vehicles: Theory and Practice. Part 1: Overview of hardware]. Automated technology research and design, № 2(49), 50–54.
14. Inozemtsev, D.P. (2013) Unmanned aerial vehicles: Theory and Practice. Part 1: Model processing of aerial photographs in the AGISOFT PHOTOSCAN AGISOFT PHOTOSCAN [Bepilotnyie letalnyie apparaty: teoriya i praktika. Chast 1. Model obrabotki aerofotosnimkov v srede AGISOFT PHOTOSCAN]. Automated technology research and design, № 3(50), 48–51.
15. Kobelev, G. P., Mishuta, D. V., Strashko, I. B. (2013) The use of unmanned aircraft systems in order to map [Primenenie bepilotnyih aviatsionnyih kompleksov v kartograficheskikh tselyah]. Automated technology research and design, № 2(49), 55–57.
16. Kostyuk, A.S. (2013) The navigation maintenance of aerial with unmanned aerial vehicles [Navigatsionnoe obespechenie aerofotos'emki s bepilotnyih letalnyih apparatov]. Automated technology research and design, № 3(50), 52–55.
17. Kurkov, V. M., Smirnov, A.V., Inozemtsev, D. P. (2014) Experience in the use of UAVs during practice for students to "Zaoksky polygon" MIIGAiK [Opyit ispolzovaniya BLA pri provedenii praktiki studentov na «Zaokskom poligone» MIIGAiK]. Geoprofi, № 4, 55–61.
18. Mihaylov, A.P. (2012) Again about the choice of digital cameras to perform aerial survey with unmanned vehicles [Esche raz o vyibore tsifrovyyih fotokamer dlya vyipolneniya aerofotos'emki s bepilotnyih apparatov]. Proceedings the 12th International Scientific and Technical Conference "From imagery to map: digital photogrammetric technologies", Algarve, Portugal, 34.
19. Sechin, A. Yu., Drakin, M.A., Kiseleva, A.S. (2013) UAV: used in aerial photography for mapping [Bepilotnyiy letatelnyiy apparat: primeneniye v aerofotos'emke dlya kartografirovaniya]. Automated technology research and design, № 3(50), 56–58.
20. Syisoeva, S. (2014). Tendentsii ryinka High-end MEMS-datchikov inertsii. Novyye urovni harakteristik i ispolneniya [Trends High-end MEMS inertial sensors. New levels of performance and characteristics]. Journal Components and Technologies, № 6, 40–46.
21. Shul'cz, R.V. (2003) Effect of error of inertial navigation system on mobile mapping accuracy [Vplyv poxybok inercialnogo navigacijnogo kompleksu na tochnist mobil'nogo znimannya]. Journal of Geodesy and Cartography, №4, 42-46.

**Р. В. Шульц,
С. П. Войтенко,
П. Д. Крельштейн,
И. А. Малина,**

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПРИ АЭРОФОТОСЪЕМКЕ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В работе рассмотрены вопросы выполнения предварительного расчета точности определения координат точек по материалам аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Приведена математическая модель определения координат по паре аэрофотоснимков. Математическая модель учитывает использование данных GNSS для определения координат центров фотографирования и корректировки инерциальной навигационной системы (INS). Угловые элементы внешнего ориентирования в приведенной математической модели определяются с помощью INS. С использованием алгоритма преобразования корреляционных матриц получено строгое выражение для выполнения предварительного расчета точности. Методом варьирования получено выражение для расчета влияния систематических погрешностей. По полученным выражениям выполнено исследование априорной точности определения координат для различных условий аэрофотосъемки. В качестве эксперимента была рассчитана точность аэрофотосъемки для БПЛА с типичными характеристиками, которые используются для создания топографических карт и планов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, расчет точности, инерциальная навигационная система, корреляционная матрица, аэрофотосъемка.

**R.V. Schultz,
S.P. Voytenko,
P.D. Krelshsteinn,
I.A. Malina**

THE ISSUE OF CALCULATING POINTS POSITIONING ACCURACY FOR AERIAL PHOTOGRAPHS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

The paper discusses the questions of preliminary accuracy calculation of the points coordinates on aerial photographs using unmanned aerial vehicles (UAVs). The mathematical model for determining the point coordinates of a pair of aerial photos are presented. The mathematical model takes into account the use of GNSS data to determine the coordinates of the photographing centers and correction of inertial navigation system (INS). The angular exterior orientation in the above mathematical model determined by INS. The main factors that effect on the accuracy of aerial photography are discussed. Using the algorithm for converting the correlation matrices obtained strict expression to perform preliminary accuracy calculation. By the method of variation, the expression obtained for calculation of the effect of systematic errors. The obtained expressions used to study a priori accuracy of the coordinates for different aerial survey conditions. Accuracy of aerial photography for a variety of shooting options are researched. Preliminary accuracy are researched for different heights of photographing and longitudinal overlapping. As an experiment, it was calculated for the accuracy of UAV with typical characteristics are used to create topographic maps and plans. These expressions better able to carry out the design of aerial photography with the help of UAV.

Keywords: unmanned aerial vehicles, accuracy calculation, inertial navigation system, correlation matrix, aerial photography.